

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222507

基于实机数据的水轮机全水头建模方法研究

蔡卫江¹, 丁钊铖祺², 曹林宁²

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 目前电力系统稳定计算采用的 PSD-BPA 平台 TV 卡模型不能反映多水头下机组的差异性, 具体表现在动态响应速度和反调准确度上。因此, 基于 TV 卡模型提出了改进方案, 即利用电站前期运行数据, 通过程序处理获取模型水头—开度—功率特性与功率— T_w 特性, 依次加入到改进模型中, 在功率模式一次调频下与 TV 卡模型相对比, 结果表明 TV 卡模型动态特性不具备多参数辨识的条件, 且不同负荷下反调仿真精确度较差, 而改进模型的响应特性符合实机运行规律, 能容纳机组多水头的差异性。

关键词: 水轮机模型; 反调; 全水头; 多参数辨识; 水流惯性时间常数

中图分类号: TK13; [TV734.1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0180-05

1 引言

水轮机调节系统具有惯性与非线性环节, 不同的机组使水轮机功率对水头、导叶开度均具有非线性特点, 使处于各种运行条件的机组的特性有明显差异^[1]。目前, 国内电力系统通用稳定计算工具为 PSD-BPA, 结构较为单一, 优点是能在一定工况点内较简便地研究调速系统规律, 但与理想水轮机模型的本质相同, 简化静态参数无法真实反映机组的动态特性。PSD-BPA 模型目前存在两种问题, 一是参数辨识单一, 固化模型后参数辨识须与机组实际运行工况作校核, 不同工况下尤其是不同负荷段, 水流惯性时间常数 T_w 实际上并不是一个确定值^[2], 其反调计算误差不可忽略; 二是 PSD-BPA 模型难以适应多种水头不同负荷的仿真研究, 在电力系统稳定计算中不同水头下原动机参数不同, 会导致仿真过程产生较大差异, 且多水头参数辨识繁琐, 基本靠经验设置, 实际效果并不理想。对此, 魏守平^[3]针对理想模型引入水流修正系数 K_y , 并对工况加以调整, 但仅给出 K_y 与水头、功率的定性关系; 苏杭等^[4]将 K_y 参数与现有 TV 卡结合, 提出了 K_y 和 TV 卡结构改进模型, 并加入改进导叶—功率关系的环节, 改善其动态响应特性, 但该方法需要额外的参数辨识; 王曦等^[5]在额定工况点线性化模型中引入 T_w 修正参数 T_n , 能够改善不同工况点反调品质。鉴此, 本文建立了基于机组试运行真实数

据的改进型水轮机模型, 通过改造现有 TV 卡模块, 利用某电站某机组的实际运行数据, 借助 Matlab Simulink 仿真平台对比分析不同建模方法效果与差异, 旨在给出 TV 卡模型改进方法建议。

2 典型水轮机模型

2.1 理想水轮机模型

水轮机动态特性通常用水轮机稳态工况下的力矩与流量特性表示, 其非线性稳态表达式为:

$$M_t = f_m(a, H, n) \quad (1)$$

$$Q = f_q(a, H, n) \quad (2)$$

式中, M_t 为水轮机力矩; a 为导叶开度; H 为水轮机水头; n 为机组转速; Q 为水轮机流量。

由式(1)、(2)可知, 水轮机的力矩流量可表示为导叶开度、水头和转速的函数。在稳态工况展开为泰勒级数, 取相对值, 并将其中偏导数替换为传递系数:

$$m_t = e_{y_t} y + e_{h_t} h + e_{n_t} x \quad (3)$$

$$q = e_{q_y} y + e_{q_h} h + e_{q_n} x \quad (4)$$

式中, m_t 为力矩偏差相对值; e_{y_t} 为水轮机导叶开度对力矩的传递系数; e_{h_t} 为水头对力矩的传递系数; e_{n_t} 为转速对力矩的传递系数; q 为流量偏差相对值; e_{q_y} 为水轮机导叶开度对流量的传递系数; e_{q_h} 为水头对流量的传递系数; e_{q_n} 为转速对流量的传递系数。

水轮机的传递系数可通过水轮机模型综合特性曲线求取, 各工况参数分别对应不同的工况点,

收稿日期: 2022-11-30, 修回日期: 2023-01-24

作者简介: 蔡卫江(1970-), 男, 硕士、教授级高级工程师, 研究方向为水轮机控制和调节, E-mail: 13913826369@139.com

即需要计算已有的水轮机特性来实现稳态方程的应用,当计算工况波动较大时,会产生计算误差,不能满足工程上的精度要求。

应用上一般采用进一步简化模型,在额定工况点附近取传递系数为定值则得到图 1 所示的理想水轮机模型。图 1 中 S 为拉普拉斯变量; P_M 为功率输出。

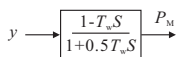


图 1 理想水轮机模型
Fig. 1 Ideal turbine model

2.2 TV 卡水轮机模型

目前电力系统稳定计算中,水轮机一般采用简化传递函数模型,包括 BPA 平台简化 TV 卡和改进刚性水击模型 TV 卡,部分 BPA 系统平台采用标准^[6]推荐的 TV 卡构建模型,相比于 TW 卡能较好地反映水轮机及其引水系统,其中 $Y-P$ 曲线通常代表设计水头下运行状况,参数 a 、 b 一般使用单一数值。但仅采用设计水头,不能准确反映整个水电站发电关系,且仿真准确度低下。应用时,需修改水轮机调速系统的调节器模型部分功率/开度给定部分修正参数以修正不同水头运行下的功率偏差^[4],由于该参数选取无数据支持且位于水轮机模型外部,一般取 1 附近做微调,修改导致整个水轮机调速系统的随动系统等中间量也随之改变,所以不能普遍使用。

3 改进型水轮机模型

以电站原始资料水轮机运转综合特性曲线为基础,利用试验和运行时监测的实际数据进行修正,得到水头—开度—导叶关系曲线,综合反映了机组运行时稳态过程。并在稳态基础上提出调速器调节时的动态改进方案,由于现场功率容易精确测量,流量往往不易准确测量,且水头一定时,机组流量变化直接关系到功率大小,依据水电站实测的功率- T_w 关系,在模型中将常数 T_w 作为时变参数加入到模型中,以弥补 T_w 值固化的弊端,优化水轮机的反调仿真准确度,获取更精确的暂态特性曲线,见图 2。图 2 中全水头全开度数据通过某电站某机组实际运行数据测试筛选所得。

3.1 开度—功率特性建模

以某高水头混流式电站为例,取某机组半年内运行数据构建特性模型,包括导叶开度、水头及有功数据见表 1。

建立开度—功率模型数据的计算方法如下。

步骤 1 筛选数据。具体包括:①适用范围

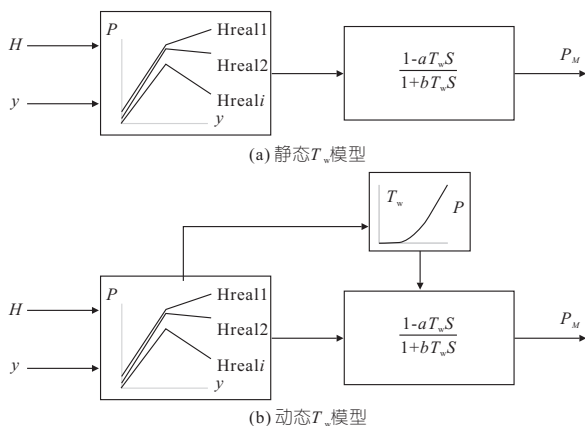


图 2 改进型全水头水轮机模型

Fig. 2 Improved full head hydraulic turbine model

表 1 机组运行数据

Tab. 1 Unit operation data

负荷	P_{real1}	P_{real2}	P_{real3}	P_{real4}	...	P_{reali}
开度	Y_{real1}	Y_{real2}	Y_{real3}	Y_{real4}	...	Y_{reali}
水头	H_{real1}	H_{real2}	H_{real3}	H_{real4}	...	H_{reali}

筛选。电站运行过程中有功率小于某最小值 P_{min} 的数据不具有参考意义,属于无效数据,水电站工况一般不会运行在此负荷内。②波动数据剔除。电站在进行变负荷或甩负荷时,非稳定过程中所测得的数据中水头—开度—功率对应关系不准确。本文采用 Visual Basic 宏语言进行数据筛选,借助 VBA 实现数据的批量处理,数据处理主程序流程见图 3。初步处理后得到水头—开度—功率关系见图 4。

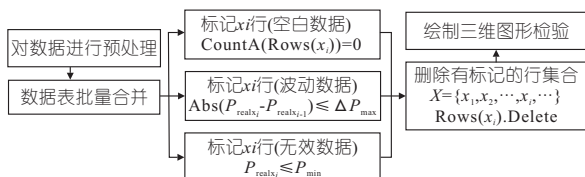


图 3 数据处理主程序

Fig. 3 Data processing main program

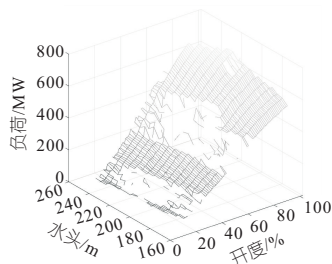


图 4 初步处理后三维图

Fig. 4 Three-dimensional diagram after preliminary treatment

步骤 2 基于该 VBA 处理方法,剔除测试数据中的波动数据后得到样本数据,样本数据包括某机组的水头—开度—功率数据,对样本数据进行拟合处理,由于图 4 数据来自真机数据,工况点均集中在高效率工作区,且实际运行时高水头下

导叶开度并不会达到 100%，亦不会稳定运行在 0 开度附近，但在建立模型时需要全水头、全开度下运行数据，因此需要采用拟合函数的方法补足。将功率数据转化为标么值，采用 Matlab 工具求出各水头的拟合曲线，并输出多项式公式，拟合时选用最小二乘法。为保证拟合精度，选用四阶多项式：

$$p = f(y) = ay^4 + by^3 + cy^2 + dy + e \quad (5)$$

对比实际数据后多次拟合最终得到较准确数据，并确定仿真时导叶开度的全部运行范围 $[0, Y_{max}]$ ，将其分割为若干区间，经式(5)计算得到某电站某号机全水头开度—功率特性，见图 5。即用最终得到的水头—开度—功率特性来优化 TV 卡开度—功率关系曲线，在仿真计算中能够适应全水头工况点。

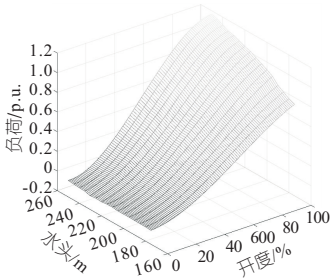


图 5 水头—开度—功率特性

Fig. 5 Head-opening-power characteristics

3.2 动态参数 T_w 的建模

水流惯性时间常数 T_w 是在额定工况下，过水管道中水流惯性的特征时间。为了反映不同工况下其特征时间，将功率实测值与 T_w 建立联系。实际工况下其表达式为：

$$T_w = \frac{Q_r}{gH_r} \sum \frac{L}{S} \quad (6)$$

式中， Q_r 为水轮机设计流量； H_r 为水轮机设计水头； g 为重力加速度； S 为每段过水管道截面积； L 为相应每段过水管道长度。

机组通过设定调速器参数 $K_p = K_{p1}$, $K_i = 0$, $K_d = 0$, $B_p = 0\%$ ，在不同有功功率下进行相同的阶跃扰动，实测得到有功功率与导叶开度数据，再通过仿真拟合方法与实测数据比较获得水流惯性时间常数，试验得到 150、500、600、670 MW 功率下 T_w 值分别为 0.01、0.85、1.40、1.82。可见， T_w 随着负荷的升高近似线性变化，采用同样的方法对该结果进行多项式拟合，将 T_w 视为功率的多项式函数，最终得到的多项式函数可求出不同功率下所对应的 T_w 值。取试验最小功率下的值 $T_{w\min} = 0.01$ ，即：

$$T_w = f(p) \quad T_w \in [0.01, 1.82] \quad (7)$$

4 模型对比

为验证改进型模型的准确性，使用改进型建模方法同时建立两种模型，分别含有动态 T_w 和不含有动态 T_w ，在验证新模型全水头适应性的同时分析 T_w 对功率模式一次调频的动态响应特性的影响。

4.1 水轮机调速系统总体模型

水轮机调速系统总体模型见图 6，除水轮机部分不同，其他部分模型与参数完全相同，调速器采用 PID 调节模型，发电机采用一阶模型。部分模型参数见表 2。表 2 中 K_p 为比例调节系数， K_i 为积分调节系数； K_d 为微分调节系数； T_{wd} 为水流惯性时间常数设计值； T_a 为机组惯性时间常数； e_n 为水轮发电机组综合自调节系数； a 、 b 均为常数。

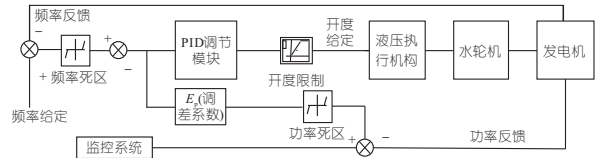


图 6 水轮机调速系统模型

Fig. 6 Hydraulic turbine governing system model

表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

参数名称	K_p	K_i	K_d	T_{wd}/s	T_a	e_n	a	b
参数值	15	1.5	2	1.295	11.37	1	1	0.5

4.2 功率模式一次调频性能对比

使用 Matlab Simulink 工具，在相应时间分别施加 0.2、-0.2 Hz 的频率扰动，在额定水头和最大水头下，监控系统给定 80% 负荷；最小水头下，监控系统给定 40% 负荷。三种模型的功率输出响应见图 7，不同水头均采用同一 PID 调节参数。

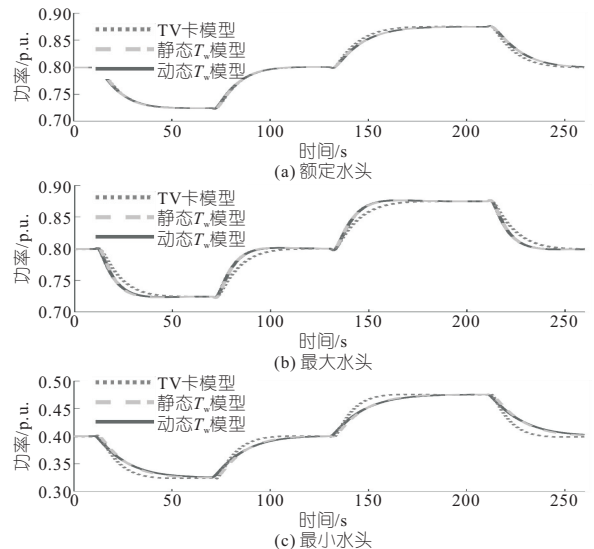


图 7 不同水头下的一次调频响应

Fig. 7 Primary frequency modulation response under different water heads

表 3 为第一次施加 -0.2 Hz 频率扰动结果,结合图 7 可得在额定水头时三种模型基本吻合,调节时间相近;但在非额定水头时,两种改进型模型均出现较长的调节时间,但原因不同,在最大水头时,动态过程出现较大超调,最小水头时其动态过程迟缓,这是因为水头不同时,导叶开度变化到功率的传递系数不同,水头较高时,在机组运行范围内,功率传递系统较大,反之较小。另外,不同导叶开度下,功率传递系数也有较大差别,特别是大开度接近额定负荷时,水轮机出力接近饱和,功率传递系数较小。因此,一组固定的 PID 参数无法满足机组全水头段负荷调节快速、稳定、精确的要求,且低水头无法适应高水头的 PID 参数,会出现调节性能迟缓,无法满足一次调频要求^[7]。从另一个角度来说,水流惯性时间常数 T_w 较大会造成功率反调,影响一次调频指标。 T_w 大小与流量的变化率相关,即与导叶的动作速率相关,总体上看,导叶动作速度越快, T_w 越大,越接近额定负荷, T_w 越大,水头较低时, T_w 要稍大一些。由此可得,相比于 TV 卡模型,改进型模型能反映实际机组在不同水头下应采取不同的优化 PID 参数以满足一次调频要求的调节特性。

表 3 一次调频仿真性能

Tab. 3 Primary frequency modulation simulation performance

模型	调节时间/s		
	额定水头	最大水头	最小水头
TV 卡模型	38.33	38.33	38.33
静态 T_w 模型	38.48	49.48	55.48
动态 T_w 模型	39.48	49.58	53.04

4.3 功率模式一次调频反调品质对比

为探究动态 T_w 对仿真反调过程的影响,分别选取额定水头和最大水头在 40%、60%、80%、100% 负荷施加 0.2 Hz 频率扰动,采用相同 PID 参数,结果见图 8、表 4。

由仿真结果可得,水头一定时非 100% 负荷时 TV 卡模型与静态 T_w 模型反调品质几乎相同;100% 负荷时 TV 卡模型与静态 T_w 模型反调峰值功率均有所下降,这与 T_w 随功率增大近似

表 4 额定水头和最大水头反调品质

Tab. 4 Rated head and the maximum head reverse quality

模型	品质参数	额定水头				最大水头			
		40% 负荷	60% 负荷	80% 负荷	100% 负荷	40% 负荷	60% 负荷	80% 负荷	100% 负荷
TV 卡模型	反调峰值功率/p.u	0.002 0	0.002 0	0.001 7	0.001 2	0.002 0	0.002 0	0.001 7	0.001 2
	反调峰值时间/s	1.64	1.61	1.70	1.35	1.64	1.61	1.70	1.35
静态 T_w 模型	反调峰值功率/p.u	0.002 1	0.002 1	0.001 8	0.001 2	0.002 4	0.002 6	0.002 6	0.14
	反调峰值时间/s	1.63	1.63	1.71	1.59	1.50	1.51	1.62	1.86
动态 T_w 模型	反调峰值功率/p.u	0.000 1	0.000 3	0.001 4	0.002 0	0.000 1	0.000 8	0.17	0.002 5
	反调峰值时间/s	0.20	0.57	1.23	2.36	0.17	0.62	1.13	1.73

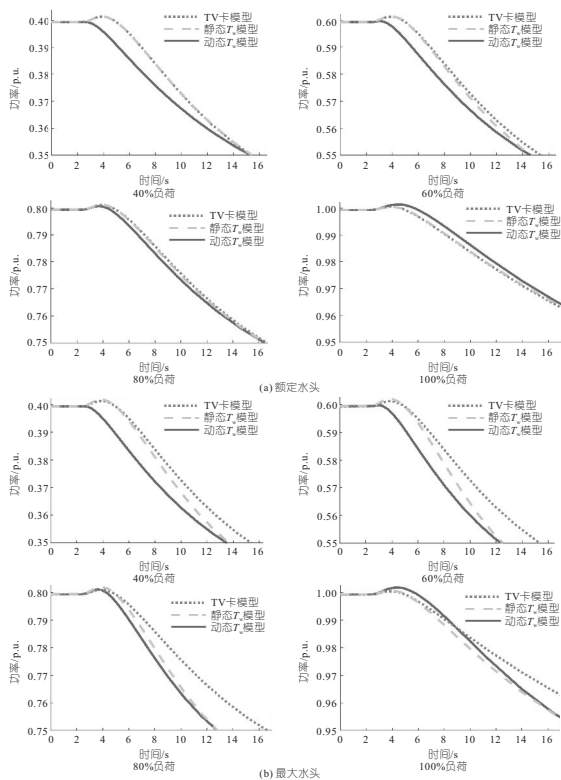


图 8 一次调频反调部分

Fig. 8 Primary frequency modulation reverse part

线性增大的实测结果相悖,原因为开度较大时机组功率变化率较小,由于 PID 型调节器直接作用于随动系统,在 T_w 值和功率调整量相同的情况下,作用在最大负荷时的开度调节量较大,导致导叶动作时间慢^[8],从而产生较小的反调。说明静态 T_w 模型虽然采用了更精确的全水头曲线,但 T_w 采用固定值,仅能反映部分负荷段的流量特性,不符合此机组运行情况。

全负荷下,动态 T_w 模型反调峰值功率则呈正相关关系:在 40% 负荷时反调基本消失,随着负荷升高,动态 T_w 模型反调峰值功率越大,在 100% 负荷时反调最大,符合机组实测 T_w 随功率的变化规律。

分析可得,开度-功率曲线辅以动态 T_w 参数可以实现符合某电站实测规律的反调特性的仿真,固定 T_w 参数在部分负荷段反调误差较大。

由表 4 可知,一定负荷时,TV 卡模型对水头

不敏感,静态 T_w 模型与动态 T_w 模型反调功率峰值均随水头变大而增大,实际上电站不同水头会采用不同 PID 参数,为作对比,最大水头采用表 5 的适应 PID 参数,其反调结果见图 9、表 6。

表 5 最大水头适应 PID 参数

Tab. 5 Maximum head adaptive PID parameters

参数名称	K_P	K_I	K_D
参数值	11	1.1	2

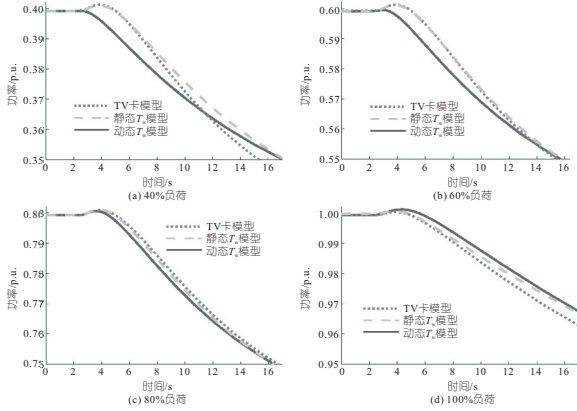


图 9 适应 PID 参数最大水头一次调频反调部分

Fig. 9 Adaptive PID parameters maximum head primary frequency modulation part

表 6 适应 PID 参数最大水头反调品质

Tab. 6 Adaptive PID parameters maximum head reverse quality

模型	品质参数	最大水头			
		40%负荷	60%负荷	80%负荷	100%负荷
TV卡模型	反调峰值功率/p.u.	0.002 0	0.002 0	0.001 7	0.001 2
	反调峰值时间/s	1.64	1.61	1.70	1.35
静态 T_w 模型	反调峰值功率/p.u.	0.001 8	0.200 0	0.001 9	0.000 9
	反调峰值时间/s	1.50	1.37	1.53	1.30
动态 T_w 模型	反调峰值功率/p.u.	0.000 1	0.000 3	0.001 3	0.001 8
	反调峰值时间/s	0.18	0.46	1.53	1.89

结合表 4、6 可得,在合适的 PID 参数下静态 T_w 模型与动态 T_w 模型在最大水头时反调均有所减少,对于部分机组来说,水头变大则机组流量变小、流速慢,所以水锤效应有所减小,由于模型中功率- T_w 特性采用某电站单一水头试验,实际上对于不同机型,结果可能会不同,采用多水头段试验参数将能获取更精确的特性。

Research on Full Head Modeling Method of Turbine Based on Real Machine Data

CAI Wei-jiang¹, DING Ke-cheng-qi², CAO Lin-ning²

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, the TV card model of PSD-PBA platform used in power system stability calculation cannot reflect the difference of units under multiple water heads, which is specifically reflected in its dynamic response speed and anti-regulation accuracy. Based on the TV card model, an improved scheme is proposed. The water head-opening-power characteristics and power T_w characteristics of the model are obtained by program processing with the early operation data of the hydropower station, and then added to the improved model successively. The results show that the dynamic characteristics of the TV card model do not have the conditions for multi-parameter identification under the power mode primary frequency modulation. Moreover, the accuracy of anti-regulation under different loads is poor. The response characteristics of the improved model accord with the operation law of the real machine and can accommodate the difference of multiple water heads of the unit.

Key words: hydraulic turbine model; anti-regulation; full head; multi-parameter identification; flow inertia time constant

5 结论

a. 仅在设计水头时,TV卡模型能够良好地反映水轮机的动态过程,但由于其多水头不适应性,非设计水头时无法进行有效多水头参数辨识及仿真,因为模型本身并未考虑多水头下原动机的特性,仅凭有限的参数修改无法改善其精度,局限性较大。

b. 在设计负荷时,固定水流惯性时间常数描述水轮机特性误差较小,但负荷变化时,其反调仿真不符合实际规律。

c. 改进型水轮机模型的动态特性在对比中均展现出其不同水头段和负荷段的各向异性,这表明模型可通过多参数辨识来适应不同条件,为解决水电站多水头参数辨识与多水头不同负荷仿真提供了参考。

参考文献:

- [1] 单振辉. 基于 MATLAB 水轮机调节系统研究及仿真[D]. 南昌:南昌工程学院,2015.
- [2] 何越,张勇,梅勇,等. 水锤效应时间常数影响研究及其参数实测[J]. 云南电力技术,2019,47(6):61-65.
- [3] 魏守平. 水轮机调节[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
- [4] 苏杭,何常胜,高玲. 水轮机及引水系统刚性水锤线性化模型改进浅论[J]. 云南电力技术,2021,49(5):66-69.
- [5] 王曦,李兴源,刘俊敏,等. 改进的水轮机非线性模型及其对电力系统仿真分析的影响[J]. 电网技术,2014,38(6):1606-1610.
- [6] 中国南方电网有限责任公司,南方电网同步发电机原动机及调节系统参数测试与建模导则:Q/CSG1206002-2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 马小雯,艾远高,余志强,等. 水电机组一次调频 PID 参数全水头适应性研究[J]. 水电站机电技术,2019,42(3):47-50.
- [8] 祁伟,沈勇,苏海鹏,等. 运行控制对水锤效应及调频能力的影响[J]. 水电能源科学,2020,38(9):179-183.